مطالعه عملکردی روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در بهینه‌یابی گزینه‌های بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی غیرمسلح*

بهنام محزون آزموده[۱] عبدالرضا سروقد مقدم[۲]

چکیده *امروزه روش‌های مختلفی برای ارزیابی معیارهای موجود در بهسازی ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می گیرد. در این میان روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با توجه به رویکرد آن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به میزان لرزه خیزی مناطق وسیعی از کشور و وجود تعداد قابل توجه سازه‌های مصالح بنایی غیرمسلح، کاربرد این روش در مورد انتخاب گزینه برتر بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی غیرمسلح با رویکرد یک طبقه بسط داده شده است. پارامترهای مؤثر در ارزیابی گزینه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های مصالح بنایی غیر مسلح طبقه بندی و اولویت گذاری شده و گزینه های مرتبط با تقویت این‌گونه ساختمان‌ها در مقایسه با یکدیگر مورد ارزیابی قرارگرفته اند. نتایج بررسی بیانگر برتری تقویت سازه با استفاده از شاتکریت دیوارهای مصالح بنایی در مقایسه با سایر گزینه‌های پیشنهاد شده می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی تحلیل سلسله مراتبی، ساختمان مصالح بنایی غیر مسلح، گزینه‌های بهسازی لرزه‌ای

An Investigation on The Analytic Hierarchy Process (AHP): Optimum Rehabilitation Process of The Unreinforced Masonry Buildings

B. M. Azmoodeh A. S. Moghadam

Abstract *Nowadays, distinctive methods are used in evaluation of the criteria in order to making decision. Among them the analytic hierarchy process (AHP) is one of the most efficient. Due to the seismicity of the vast majority part of the country and also the existence of the large number of the unreinforced masonry buildings, the application of the AHP method in order to reach to the best alternative of the strengthening of these buildings are developed. The effective parameters in the evaluation alternatives are classified and suitable alternatives for the rehabilitation are evaluated. The results illustrate the preference of the strengthening the masonry walls with the shotcrete, compared to the other alternatives.*

Key Words The Analytic Hierarchy Process, Unreinforced Masonry Building, Seismic Rehabilitation Alternatives

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ۱۳۸۸/۱۲/۱۹ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۸۹/۱۱/٤ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

(۲) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، پژوهشگاه سازه، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

مقدمه

زلزله رخدادی غیرقابل پیش بینی است که احتمال وقوع این حادثه مخرب در هر لحظه احساس می‌شود. تقویت هرچه بیشتر سازه‌های آسیب پذیر کمک قابل توجهی به امنیت جامعه و حفظ سرمایه‌های ملی خواهد نمود. بنابراین مطالعه روش‌های مناسب در ساختار مدیریت زلزله با در نظر گرفتن ملاحظات اجتماعی و اقتصادی، تأثیر بسزایی در محقق نمودن این مهم خواهد گذاشت. در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به فرآیند بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، شده است. در این بین، ساختمان‌های مدارس با توجه به اهمیت خاصی که دارنده این‌گونه ساختمان‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. تعداد زیادی از ساختمان‌های مدارس در این سال‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. بالغ بر نیمی از این ساختمان‌ها، دارای سازه مصالح بنایی غیرمسلح بوده‌اند که بخش عمده‌ای از آن‌ها آسیب پذیر ارزیابی شده‌اند. در این راستا، انجام پروژه‌های مطالعات این ساختمان‌ها با طولانی شدن مدت زمان، روبرو بوده‌اند که نظر به تخصیص بودجه نسبتاً بالا در این بخش و زمان‌های از دست رفته به گونه‌ای باعث بروز خسارات مالی می‌گردد. این موضوع سیاست گذاران را با چالشی جدید مواجه نموده است. بنابراین، وجود روش یا روش‌هایی به منظور ارزیابی سریع و انتخاب گزینه برتر بهسازی، در مورد ساختمان‌های آسیب پذیر می‌تواند به کاهش زمان و هزینه‌ها منجر شود. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های انسان، قدرت تصمیم‌گیری است. آنگاه که این تصمیم‌گیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد، مسؤولیت و ضرورت در نحوه تصمیم و انتخاب، دارای رویکرد خاص می باشد. فرآیند انتخاب در فضاهای گسسته و تصمیم‌گیری‌های تک معیاره، آسان است؛ اما در تصمیم‌گیری‌های کلان، نیاز به استفاده از روشی مناسب به منظور تبیین و ارزیابی پارامترهای انتخاب می باشد. تکنیک‌های مختلفی در تصمیم گیری‌های چند معیاره (MCDM) از جمله روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)، روش تحلیل سود- هزینه (CBA)، روش تحلیل (K-T) و روش سودمندسازی مدل‌های چند معیاره (MAUT) وجود دارد [1]. روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP) به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها مورد توجه مدیران قرار گرفته است.

روش تحلیل سلسله مراتبی

سلسله مراتبی، یک نمایش گرافیکی از مسأله پیچیده واقعی می‌باشد که در رأس آن، هدف کلی مسأله و در سطوح بعدی، معیارها و گزینه‌ها قرار دارد [۲]. در واقع این روش تحلیل یک تکنیک ساخت یافته، به منظور سازمان دهی کردن فرآیند تصمیم گیری مسایل پیچیده است. به طورکلی پروسه انتخاب یک گزینه، به عنوان گزینه برتر نیاز به چند عامل اصلی دارد. فرد یا گروه تصمیم گیرنده باید دارای تخصص ویژه در تحلیل و ارزیابی گزینه‌ها داشته باشد. دارا بودن دانش فنی مرتبط، از مهم‌ترین اصول این فرآیند می‌باشد. هم‌چنین اصل انتخاب بر پایه قضاوت‌های منطقی و مبتنی بر علوم ریاضیات و روانشناسی انجام می‌پذیرد؛ به‌گونه‌ای که دقت در انجام قضاوت‌ها تصمیم‌گیری در امر انتخاب را با کیفیت بالاتر می‌شود. تصمیم‌گیری در مورد مسایل پیچیده نیاز به تأمل بیشتر دارد. استفاده از افراد خبره، باعث افزایش سرعت و دقت تحلیل می‌شود. هم‌چنین بهره جستن از نظرها و افکار دیگران، خطاهای تصمیم‌گیری را کاهش می‌دهد. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است و محققان با استفاده از این روش سعی در بهینه سازی فرآیند انتخاب داشته‌اند.

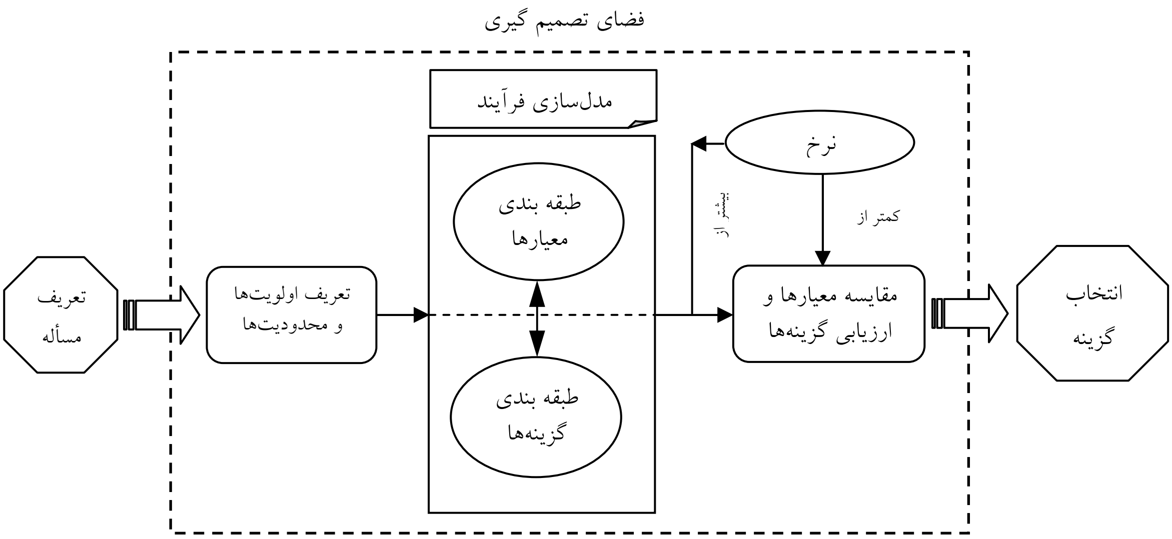
در همین راستا، روش تحلیل سلسله مراتبی به عنوان روشی مدون، تحلیل مناسب با دقت بالا از معیارها به منظور انتخاب بهینه گزینه برتر انجام می دهد. این روش در سال ۱۹۸۰ توسط آقای ساعتی بنیان نهاده شد و مورد توجه تصمیم گیرندگان قرار گرفت [3]. هم‌چنین این روش، موضوع پژوهش محققان بسیاری در زمینه‌های

مختلف بوده است که می‌توان به بسط معیار مقایسه در مسایل غیرملموس[4]، در نظرگرفتن سودها، هزینه‌ها، فرصت‌ها و ریسک‌های تصمیم[5]، استفاده در تحلیل و مدیریت ریسک [6]، انتخاب بهترین الیاف کتان در صنعت [7]، تلفیق نتایج پراکنده در گروه‌های بزرگ تصمیم [8]، انتخاب گزینه برتر در پروژه نگهداری راه [9]، بررسی روشی مناسب در تصمیم‌گیری پاک‌سازی مناطق آلوده [10]، انجام فرآیند تصمیم با بهره‌گیری از معیارهای پویا [11] اشاره کرد. در برخی از مقالات نیز به مزایا و چالش‌های روش تحلیل سلسله مراتبی پرداخته شده است [12,13]. در روانشناسی مقایسه بین دو آیتم بسیار راحت‌تر و دارای دقت بالاتری است تا مقایسه چندین گزینه با یکدیگر [12]. این موضوع هنگامی که تعداد آیتم‌های مقایسه‌ای افزایش می‌یابد بیشتر حایز اهمیت می‌گردد. در مسایلی که تعداد پارامترهای متعدد برای ارزیابی می‌باشد گروه تصمیم گیرنده، نیاز به تمرکز بسیار بالا به منظور مقایسه و ارزیابی دارند، به گونه‌ای که انتخاب، با در نظرگرفتن کلیه ضوابط، شرایط و محدودیت‌ها انجام پذیرد.

جزییات روش و الگوریتم مقایسه

تحلیل تصمیم، یک روند منطقی از ایده‌ها، تجارب و اطلاعات است تا یک تصمیم متعادل و موجه اعمال شود [1]. به منظور انجام تصمیم گیری، ابتدا باید به تعریف و تفسیر مسأله در شمای کلی پرداخت. به این ترتیب مدلی جامع و منطقی از مسأله، با در نظر گرفتن کلیه اولویت‌ها و محدودیت‌ها تهیه می‌گردد. زمانی تصمیم آرمانی و بهینه خواهد شد که کلیه افراد گروه تصمیم گیرنده، تعریف صحیحی از کلیه پارامترهای مؤثر در ارزیابی داشته باشند. به این ترتیب مدل‌سازی فرآیند تصمیم با استفاده از شناخت این پارامترها شکل خواهد گرفت. به طور کلی فرآیند تصمیم دارای سه بخش اصلی است که این بخش‌ها شامل: شناخت هدف مسأله، تعیین معیارهای مرتبط با هدف و در نهایت، مقایسه گزینه‌های پیشنهادی براساس مدل تحلیلی و انتخاب بهترین گزینه می‌باشد (نمودار ۱).

نمودار ۱ الگوریتم روش ارزیابی گزینه‌های بهسازی



مطابق با آنچه در نمودار مشخص گردید در مرحله اول نیاز به تعریف از مسأله طرح، که همان هدف فرآیند تصمیم گیری است، می‌باشد. هر تصمیم دارای یک هدف مشخص، معیارها، زیرمعیارها و هم‌چنین گزینه‌هایی که حول این هدف تعیین می‌شوند، است. در فضای تصمیم گیری، ضمن تعریف اولویت‌ها و محدودیت‌های موجود که معمولاً با شرایط محلی و نیاز کارفرما هم‌ساز است، معیارها و گزینه‌های مناسب تعیین می‌گردد. با شناخت معیارها و گزینه های مرتبط، مدل‌سازی از فرآیند تصمیم، انجام می‌پذیرد. فرد یا گروه تصمیم گیرنده با استفاده از تجربیات و قضاوت‌ها به مقایسه نسبی لایه‌های مختلف معیارها و سپس ارزیابی گزینه‌ها در هر یک از معیارها می‌پردازد. برای تحلیل معیارها و گزینه‌ها به وسیله وزن‌های نسبی هر یک از آیتم‌ها انجام می‌پذیرد: در روش تحلیل سلسله مراتبی، وزن نسبی با استفاده از تشکیل ماتریس‌های مقایسه، به صورت زوجی ارزیابی و محاسبه می‌گردد [13].

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & . & . & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & . & . & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & . & . & a_{3n} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ a_{n1} & a_{n2} & . & . & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \Rightarrow a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

به طوری که: a_{ij}؛ مقدار ارجحیت نسبی معیار (i) را نسبت به معیار (j) نشان می‌دهد.

پس از شناخت معیارها و طبقه بندی آن‌ها بر اساس عملکرد، هر یک از معیارها به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه شده و بر اساس ارجحیت نسبی، به هر یک از معیارها وزن نسبی مشخصی، اختصاص می یابد. بدین ترتیب ماتریس مقایسه هر یک از معیارها و گزینه‌ها تشکیل خواهد شد. فلسفه مقایسه در این روش براساس اولویت معیار (i) نسبت به معیار (j) است. مطابق با جدول (۱) مقایسه نسبی زوجی معیارها در مقیاس ۱ تا ۹ به نحوی که مجموع ارزش هر قسمت برابر با ۱ گردد، تعیین می شود.

جدول ۱ مقیاس مقایسه‌های زوجی نسبی معیارها و گزینه‌ها

تعریف شاخص اهمیت	درجه اهمیت نسبی
اهمیت یکسان	۱
اهمیت کم	۳
اهمیت متوسط	۵
اهمیت زیاد	۷
اهمیت خیلی زیاد	۹

روش‌های مختلفی برای به دست آوردن وزن‌های نسبی نهایی معیارها وجود دارد که می‌توان به روش‌های حداقل مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه و روش‌های تقریبی اشاره کرد [۲]. در روش حداقل مربعات لگاریتمی سعی می‌شود که حاصل‌ضرب اختلافات یا به عبارتی میانگین هندسی اختلافات، به حداقل برسد.

$$MINZ = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\ln a_{ij} - \ln\left(\frac{w_i}{w_j}\right)\right)^2$$

در روش بردار ویژه برای هر ماتریس A، اگر دترمینان ماتریس $(A - \lambda.I)$ را محاسبه نموده و آن را مساوی صفر قرار دهیم، مقادیر ویژه (λ) محاسبه می‌شوند. با استفاده از رابطه $(A - \lambda_{max} I) \times W = 0$ مقادیر W_i محاسبه می‌شوند.

دو روش اول، دارای دقت خوب و روش سوم در واقع تقریبی از روش بردار ویژه می باشد که با دقت‌های مختلف، محاسبات را آسان می‌کند [۲]. در روش مجموع سطری، عناصر هر سطر بردار، ستونی را تشکیل می‌دهند که بردار ستونی نرمالیزه شده بردار وزن می‌باشد. در روش مجموع ستونی ابتدا مجموع عناصر هر ستون محاسبه و بردار سطری تشکیل شده معکوس و در نهایت بردار سطری نرمالیزه شده بردار وزن خواهد بود. در روش میانگین حسابی، عناصر هر ستون نرمالیزه شده و سپس میانگین سطری عناصر بیانگر بردار وزن خواهد

بود. در روش چهارم میانگین هندسی عناصر، هر سطر محاسبه می‌شود. نتیجه آن که بردار، نرمالیزه شده، میانگین‌های حاصله بردار وزن می‌باشد.

همان‌طورکه در نمودار (۲) ملاحظه می‌شود، هریک از ٤ روش تقریبی در یک لایه خاص مورد بررسی قرار گرفته‌اند به نحوی که بردار نرمالیزه شده وزن‌های حاصله، بیانگر پراکندگی نسبتاً قابل قبول روش میانگین حسابی در مقایسه با سه روش دیگر است. به همین دلیل، در این تحقیق از این روش در محاسبه وزن‌های نسبی استفاده شده است.

نرخ سازگاری ماتریس در مورد درایه‌هایی از ماتریس خاص که $a_{ij} \neq \frac{w_i}{w_j}$، فاصله $(\lambda_{max} - n)$ از خطای صفر را معین می‌نماید، از حل معادله $A.W = \lambda_{max}.W$ به دست می‌آید. به طورکلی محاسبه وزن در ماتریس‌های سازگار، آسان است. ولی در مورد ماتریس‌های ناسازگار، نیاز به محاسبه نرخ سازگاری به منظور بهینه سازی عملیات مقایسه می‌باشد. پس از انجام مقایسه‌ها، مقدار ناسازگاری ماتریس‌ها محاسبه می‌شود. در صورت تجاوز این نرخ از عدد ۰٫۱۰، نیاز به بازبینی ماتریس‌ها و مقایسه‌های انجام شده می‌باشد. [14]

$$C.I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$
$$C.R = \frac{I.I}{R.I} \leq 0.1 \qquad (۱)$$

که در آن:

n: طول ماتریس

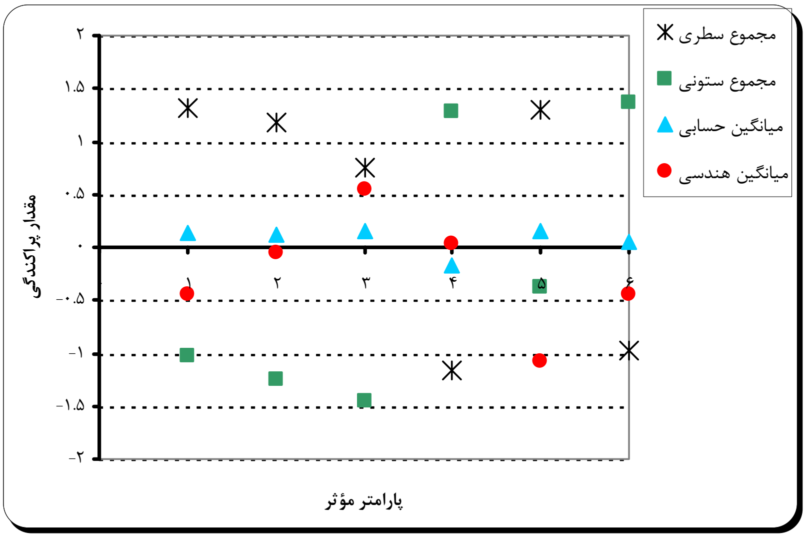
λ_{max}: حداکثر مقدار ویژه

C.I: شاخص سازگاری

R.I: شاخص سازگاری ماتریس تصادفی (جدول ۲)

C.R: نرخ سازگاری

نمودار ۲ مقایسه نتایج روش‌های تقریبی محاسبه وزن نسبی معیارها و گزینه‌ها



جدول ۲ شاخص سازگاری ماتریس‌های تصادفی

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I.I.R	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.45

در نهایت وزن نهایی هر گزینه در یک فرآیند سلسله مراتبی از مجموع حاصل ضرب اهمیت معیارها در وزن گزینه‌ها به‌دست می‌آید.

$$A_{AHP} = \max \sum_{i=1}^{n} a_{ij}.w_j \qquad (۲)$$

بهینه‌یابی گزینه بهسازی ساختمان مصالح بنایی غیرمسلح

هر ساله هزینه‌های زیادی جهت توسعه طرح‌های عمرانی انجام می‌پذیرد. اختصاص منابع در بخش‌های صحیح همواره از دغدغه‌های سیاست گذاران این بخش بوده است. تحقیقات در این زمینه نشانگر اهمیت و توجه بیشتر به اعمال روش‌های بهینه سازی در سیستم‌های مدیریت می‌باشد. از آن جمله می‌توان به ارزیابی پارامترهای مؤثر در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها [14]، بررسی سودها و هزینه‌های کاهش خسارات زلزله [15] و هم‌چنین مطالعه عوامل مؤثر در طراحی بهینه ساختمان به منظور پایایی بیشتر [16] اشاره نمود. نظر به رویکرد این تحقیق به عنوان بررسی روشی کاربردی جهت بهینه سازی فرآیند تصمیم و انتخاب گزینه برتر بهسازی، در این بخش به شناسایی پارامترهای مؤثر و مطالعه عملکردی روش در ارزیابی گزینه‌های بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی غیرمسلح پرداخته می‌شود. سازه‌های مصالح بنایی به عنوان سازه‌های با سیستم سازه‌ای بار بر دیوارهای مصالح بنایی که عمدتاً به صورت غیرمسلح اجرا می‌شوند سهم عمده‌ای از ساخت و سازه‌ای کشور را شامل می‌شوند که مطالعات سال‌های اخیر حاکی از آسیب پذیری این سازه‌ها می‌باشد. در همین راستا ساختمان مدارس به دلیل اهمیت، نیاز به توجه ویژه به لحاظ کفایت لرزه‌ای سیستم در برابر بارهای لرزه‌ای دارند؛ تا در حین وقوع زلزله بتوانند قابلیت بهره برداری خود را حفظ نمایند. در سال‌های اخیر زمان نسبتاً زیادی صرف انجام پروژه‌های مطالعات بهسازی این ساختمان‌ها انجام شده است. از دست رفتن این زمان‌ها باعث بروز خسارات در مجموعه‌های تصمیم گیرنده و یا حتی بخش‌های مشاوره گردیده است. بنابراین لزوم وجود روش یا روش‌هایی با صرف زمان کمتر به ارزیابی گزینه‌های پیشنهادی جهت بهسازی این ساختمان‌ها پرداخته گردد، احساس می گردد. از اینرو، در این تحقیق تلاش بر آن بوده است تا به شناسایی معیارهای مهم در ارزیابی گزینه‌های مرتبط با تقویت یک ساختمان مصالح بنایی غیرمسلح با کاربری آموزشی پرداخته شود.

در نگاه کلی، مراحل انجام روش را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود: (نمودار ۱)

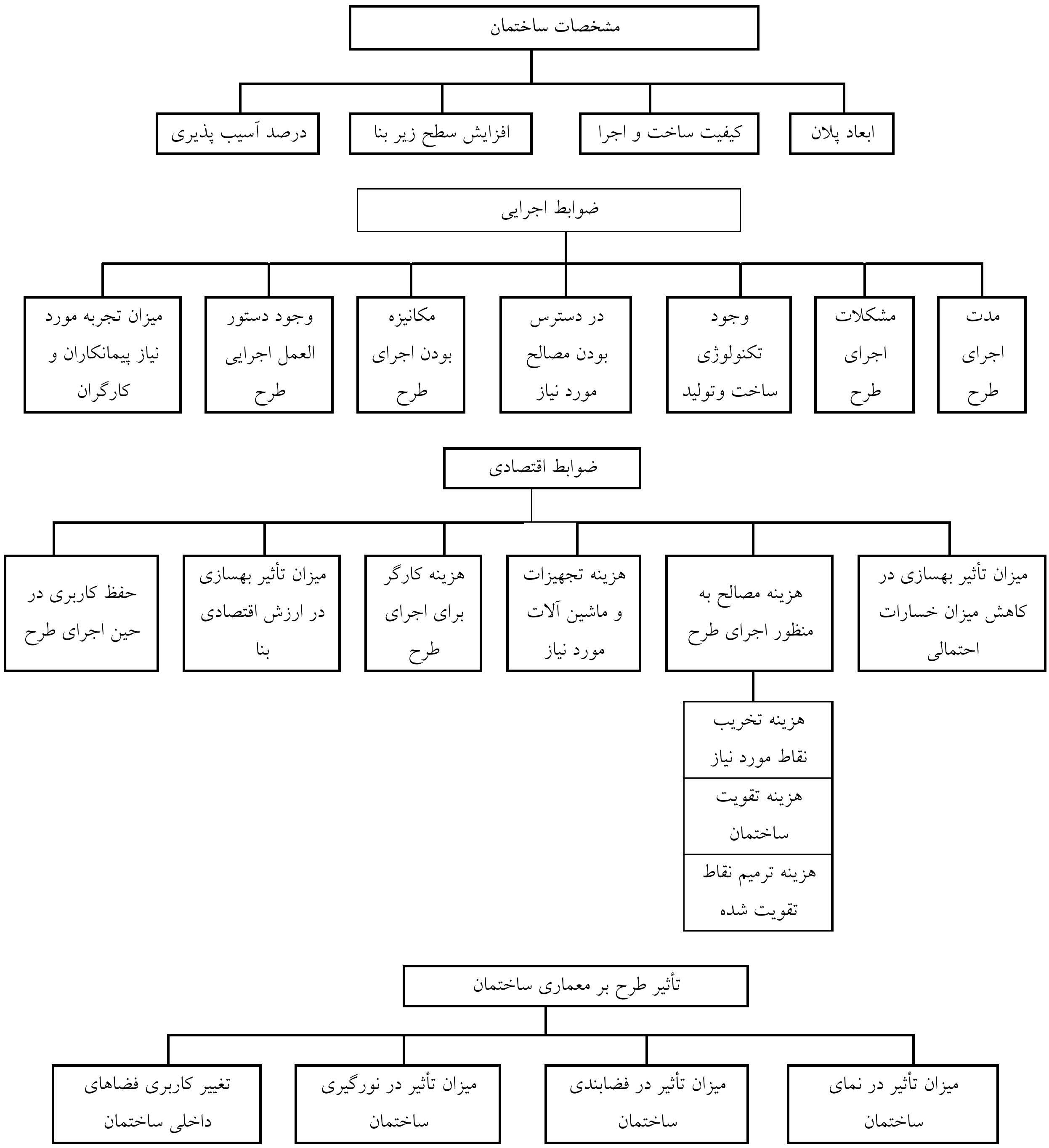
۱- شناخت پارامترهای مؤثر در ارزیابی گزینه‌ها
۲- تعریف اولویت‌ها و محدودیت‌ها
۳- مدلسازی فرآیند تصمیم
۳-۱- طبقه بندی معیارها مطابق با ضوابط هدف مسأله
۳-۲- طبقه بندی گزینه‌ها مطابق با ضوابط هدف مسأله
٤- مقایسه معیارها در لایه‌های مختلف
٥- محاسبه نرخ سازگاری ماتریس‌های مقایسه
٦- ارزیابی گزینه‌ای پیشنهاد شده در هر یک از معیارها
۷- تصمیم گیری نهایی و انتخاب گزینه برتر

معیارها و زیرمعیارها در ارزیابی گزینه‌ها

به منظور انجام ارزیابی مقایسه‌ای گزینه‌ها نیاز به مدلسازی از فرآیند تصمیم می‌باشد و در گام اول به شناسایی معیارهای مقایسه گزینه‌های بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی غیرمسلح پرداخته می شود. مطالعات زیادی در مورد بررسی آسیب پذیری و بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی انجام شده است. در این راه کارفرمایان با چالش‌های عمده‌ای مواجه بوده‌اند. بسیاری از مطالعات به دلیل طولانی شدن زمان انجام، به مرحله اجرای طرح، منتهی نشده‌اند که این مسأله باعث بروز خسارات مالی در دستگاه‌های ذیربط شده است. به همین دلیل سعی شد تا با معرفی الگوریتم مقایسه‌ای به ارزیابی گزینه‌های متناسب با نوع سیستم سازه‌ای پرداخته شود تا از این طریق برای این ساختمان‌ها گزینه برتر بهسازی مورد ارزیابی سریع قرار گیرد.

همان‌گونه که اشاره شد برای ارزیابی گزینه‌ها نیاز به شناسایی پارامترهای مؤثر است. با مطالعه روش‌ها و دستورالعمل‌های مرتبط [۱۸، 19، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳]، تجارب به دست آمده در سال‌های اخیر و هم‌چنین با توجه به مطالعه انجام شده در ارزیابی کلی گزینه‌های بهسازی ساختمان‌ها [15] جهت مدل‌سازی تصمیم، فرآیند به شش بخش اصلی شامل: مشخصات ساختمان، ضوابط اجرایی، ضوابط اقتصادی، ضوابط فنی، تأثیر طرح بر معماری و هم‌چنین تأثیر بر تأسیسات ساختمان تقسیم شده است هر مجموعه نیز با توجه به موارد موجود به زیرمجموعه‌هایی طبقه بندی شده‌است (نمودار ۳).

نمودار ۳: طبقه بندی معیارهای مرتبط با ارزیابی گزینه‌های بهسازی



مشخصات ساختمان معرف پارامترهایی است که نمایانگر وضع موجود ساختمان می‌باشد. ابعاد پلان می‌تواند بر نحوه انتخاب گزینه‌ها به لحاظ نحوه توزیع نیرو، کیفیت ساخت و اجرای مناسب و هم‌چنین میزان آسیب پذیری ساختمان با بهره‌گیری از ظرفیت موجود مؤثر باشد. در برخی از موارد، هدف کارفرما تقویت سازه توام با افزایش سطح زیربنا است که گزینه‌های تقویت از خارج ساختمان مناسب می‌باشند.

ضوابط اجرایی طرح مشخص کننده مؤلفه‌هایی است که به صورت مستقیم با اجرای گزینه‌ها ارتباط دارد. ماهیت برخی از پروژه‌ها ایجاب می‌نماید که اجرای طرح در زمان محدودی پایان یابد. با توجه به شرایط مسأله، اجرای این‌گونه طرح ها به دلیل وجود ساکنین جهت اجرا با مشکلات همراه است. در همین راستا وجود تکنولوژی اجرا، مکانیزه بودن اجرا در کشور، وجود دستورالعمل اجرایی و هم‌چنین میزان تجربه مورد نیاز، سهم به سزایی در انتخاب گزینه بهینه جهت سهولت در امر اجرای طرح خواهد داشت.

ضوابط اقتصادی بیانگر عوامل تأثیر گذار در انتخاب گزینه‌ای است که کمترین اثر در ارزیابی اقتصادی طرح را دارا باشد. کارفرمایان اغلب به دنبال کاهش هزینه‌های اجرا هستند. اجرای طرح با هزینه کمتر از این نقطه نظر بسیار حایز اهمیت می‌باشد. در این مرحله از ارزیابی مواردی چون هزینه تجهیزات موردنیاز، هزینه کارگر نیز بخشی از هزینه‌های کلی اجرا خواهند بود. در صورت نیاز کارفرمایان و امکان افزایش سطح زیربنا، طرح تقویت می‌تواند توأم با افزایش ارزش اقتصادی بنا باشد. هم‌چنین از دیگر بخش‌های مهم این مرحله از اجرای طرح تقویت، حفظ کاربری سازه در حین اجرای طرح می‌باشد. این مسأله در سازه‌های با اهمیت ویژه که بروز خلل در کاربری آن، باعث خسارات مالی به مجموعه می‌شود بیش از پیش تأثیرگذار خواهد بود.

ضوابط فنی طرح، نشانگر اثرات پارامترهای مرتبط با رفتار سازه در زلزله بر عملکرد گزینه‌های تقویت سازه موجود می‌باشد. پارامترهایی چون: تأثیر تقویت بر ظرفیت، سختی و شکل پذیری سازه، میزان سختی سقف، میزان انسجام ساختمان، نحوه کامل نمودن مسیر بار، تأثیر بر منظمی ساختمان و یا حتی کاهش در وزن سازه که منجر به کاهش نیروی ورودی لرزه‌ای می‌گردد. با توجه به نوع سیستم سازه‌ای ساختمان‌های مصالح بنایی، امر بهسازی و تقویت آن‌ها گاهی همراه با تقویت‌های موضعی المان‌های باربر که دیوارهای آجری هستند، همراه است. در این خصوص انتخاب گزینه‌هایی که به صورت توأم باعث افزایش ظرفیت سازه به صورت کلی و بهبود نقایص موضعی سازه می‌گردند، دارای اولویت هستند. شایان ذکر است که مواردی چون وجود آیین نامه‌های طراحی، میزان حساسیت عملکرد طرح تقویت به خطاهای محتمل و تجارب به دست آمده از زلزله‌های پیشین از جمله پارامترهای حیاتی بررسی و انتخاب گزینه‌های تقویت به شمار می‌رود.

معماری طرحی بهینه است که کمترین تأثیر را در معماری کلی سازه داشته باشد. به طورکلی طرح‌های پیشنهادی باید به گونه‌ای باشند که کمترین تأثیر را در نمای ساختمان، فضابندی کلی، نورگیری و هم‌چنین در تغییر کاربری فضاهای داخلی ساختمان داشته باشد. هم‌چنین تأثیرات تداخل طرح پیشنهادی با تأسیسات ساختمان و لزوم تغییر و یا جابه جایی آن می‌تواند باعث تحمیل هزینه‌های نسبتاً زیاد به پروژه گردد. به طورکلی گزینه‌هایی که از خارج به ساختمان متصل می‌گردند همراه با برآورده سازی کلیه ضوابط اشاره شده، تداخلی با تأسیسات داخلی ساختمان ندارد.

پس از شناسایی و طبقه بندی معیارها و گزینه‌ها، با استفاده از روند تحلیل تصمیم مبتنی بر مدیریت ارزش معیارها، وزن نسبی معیارها و در نهایت گزینه‌های پیشنهادی با استفاده از قضاوت مهندسی حاصل می‌گردد. شایان ذکر است که در روند تحلیل، ضریبی به عنوان ضریب سابقه فعالیت (جدول ۳) متناسب با مقدار فعالیت مرتبط کارشناس در امر بهسازی جهت اصلاح

نتایج نهایی با درنظر گرفتن تجربیات لازم ارزیابی، استفاده شده است.

جدول ۳ تعیین ضریب سابقه فعالیت

مقدار سابقه فعالیت مرتبط کارشناس	ضریب سابقه فعالیت
بدون سابقه	۰,۹
سابقه تا ۳ سال	۱,۰
سابقه بیش از ۳ سال	۱,۱

ماتریس‌های مقایسه زوجی مطابق با الگوریتم روش ارایه شده برای هر مجموعه از معیارها و هم‌چنین ماتریس گزینه‌ها در مقابل هر یک از معیارها تشکیل و بر اساس قضاوت مهندسی و تجارب به دست آمده نویسندگان در سال‌های اخیر، مورد بررسی قرار گرفتند. بدین ترتیب وزن نسبی که بیانگر ارجحیت هر المان مدل در هر یک از مجموعه‌های مورد بررسی، به طوری‌که نرخ ناسازگاری از ۰,۱ بیشتر نگردد، به دست آمد. در نهایت با استفاده از رابطه (۲) وزن نهایی نرمالیزه شده هر یک از گزینه با اعمال ضریب سابقه حاصل گردید.

همان‌گونه که در جدول (٤) ملاحظه می‌گردد در بخش مشخصات ساختمان معیار درصد آسیب پذیری ساختمان دارای ارزش بالاتر ارزیابی شد. ساختمان‌هایی که میزان آسیب پذیری آن‌ها زیاد باشد، می‌توان از گزینه‌هایی هم‌چون سیستم دیوار برشی و یا قاب ساختمانی استفاده کرد که از ظرفیت دیوارهای موجود استفاده نمی‌کنند. در بخش ضوابط اجرایی معیارهای زمان اجرا و صعوبت اجرا دارای ارزش بالاتر، ارزیابی شده‌اند. در صورت نیاز پروژه به اتمام در زمان کوتاه، گزینه تقویت با استفاده از FRP می‌تواند گزینه‌ای مناسب باشد. هم‌چنین در بسیاری از پروژه‌ها در حین اجرای طرح پیمانکاران با مشکلات خاصی روبرو می‌گردند که این مشکلات می‌تواند باعث تحمیل هزینه‌های اضافی به طرح شود. در این بررسی گزینه تقویت با استفاده از FRP نیز دارای برتری ارزیابی شد. در بخش ضوابط اقتصادی معیارهای هزینه مصالح و حفظ کاربری در حین اجرا دارای ارزش بالاتر، ارزیابی شده‌اند. هزینه مصالح به عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های مطالعات است. در این بررسی گزینه تقویت با استفاده از FRP شامل کمترین هزینه تخریب و ترمیم و گزینه تقویت با استفاده از شاتکریت دارای کمترین هزینه تقویت ارزیابی گردید. مسأله مهم دیگر، حفظ کاربری در حین اجرای طرح است که شامل برخی از ساختمان‌ها با کاربری خاص می‌شود در این گونه موارد، استفاده از گزینه‌های تقویت از خارج ساختمان، می‌تواند مؤثر باشد. در بخش ضوابط فنی، معیارهای موجود، آیین نامه‌های طراحی و اتصال به دیافراگم طبقه، دارای ارزش بیشتر ارزیابی شده‌اند. وجود آیین نامه طراحی از دیگر بخش‌های مهم و از الزامات طراحی گزینه‌ها می‌باشد که در مورد گزینه‌های دیوار برشی و قاب ساختمانی در آیین‌نامه‌های موجود به صراحت مورد اشاره قرار گرفته‌اند. اگرچه که دستورالعمل‌هایی در خصوص ضوابط طراحی گزینه‌هایی چون تقویت با استفاده از شاتکریت و FRP مورد تدوین قرار گرفته‌اند ولیکن در این بررسی، گزینه‌های افزودن دیوار برشی و هم‌چنین افزودن قاب در مقایسه دارای ارجحیت ارزیابی شده‌اند. اتصال اعضای تقویتی به دیافراگم ساختمان دارای مشکلات خاص و گاه باعث افزایش هزینه‌های اجرای طرح می‌گردد. در این مورد گزینه تقویت با استفاده از FRP دارای شرایط مناسب‌تری ارزیابی شده است. هم‌چنین در بخش تأثیر در طرح بر معماری ساختمان معیار تأثیر بر نمای دارای ارزش بالاتر ارزیابی شد. نتایج بررسی نشانگر تأثیر و تداخل کمتر گزینه تقویت با استفاده از FRP در نمای ساختمان می‌باشد. در نهایت گزینه تقویت‌های خارج از ساختمان به دلیل تصرف کم در داخل ساختمان تأثیر کمتر بر تأسیسات ساختمان و در نتیجه دارای برتری در مقابل با گزینه‌های تقویت در داخل ساختمان می‌باشند.

به منظور بیان هرچه بهتر نحوه محاسبه وزن نهایی نرمالیزه شده معیارها، وزن‌های نسبی به دست آمده معیارهای اصلی به عنوان نمونه در جدول (۵) ارایه شده است.

جدول ٤ وزن نسبی معیارها، زیرمعیارها و گزینه های پیشنهادی بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی

						تقویت دیوارهای مصالح بنایی بوسیله شاتکریت	تقویت سازه مصالح بنایی با اجرای دیوار برشی	تقویت دیوارهای مصالح بنایی بوسیله الیاف FRP	تقویت خارج از ساختمان توسط سازه فولادی	تقویت خارج از ساختمان بوسیله افزودن قاب بتنی	تقویت خارج از ساختمان بوسیله افزودن دیوار برشی	*I.R*
مشخصات ساختمان	۰.۸۴	ابعاد پلان			۱.۲۸۰	۳.۵۹	۱.۶۴	۳.۵۹	۰.۶۶	۰.۶۶	۰.۶۶	0.01
		کیفیت ساخت و اجرا			۲.۳۷۲	۱.۳۱	۸.۷۲	۰.۷۸	۴.۷۸	۲.۲۰	۲.۲۰	0.06
		افزایش سطح زیر بنا			۰.۶۵۹	۰.۱۹	۰.۱۹	۰.۱۹	۱.۶۷	۱.۶۷	۱.۶۷	0.00
		درصد آسیب پذیری			۵.۶۸۸	۲.۷۷	۵.۵۰	۱.۴۹	۱۲.۷۲	۱۲.۷۲	۱۲.۷۲	0.02
		امتیاز بخش (درصد)				۹.۳۱٪	۱۹.۰۵٪	۷.۱۷٪	۲۳.۵۴٪	۲۰.۴۶٪	۲۰.۴۶٪	
ضوابط اجرائی	۱.۴	مدت اجرای طرح			۲.۱۴۹	۱.۰۵	۲.۰۶	۱۱.۷۲	۶.۰۳	۴.۲۹	۴.۸۶	0.04
		مشکلات اجرای طرح			۳.۳۷۹	۱.۷۱	۳.۶۵	۱۹.۰۲	۱۱.۷۱	۷.۶۵	۳.۴۴	0.05
		وجود تکنولوژی ساخت و تولید			۰.۳۶۶	۰.۴۷	۱.۸۷	۰.۱۹	۰.۸۶	۰.۸۶	۰.۸۶	0.06
		در دسترس بودن مصالح مورد نیاز			۰.۳۳۴	۰.۹۰	۰.۹۰	۰.۱۸	۰.۹۰	۰.۹۰	۰.۹۰	0.00
		مکانیزه بودن اجرای طرح			۱.۱۹۷	۱.۲۱	۶.۲۵	۰.۶۹	۳.۵۳	۳.۵۳	۱.۵۰	0.06
		وجود دستور العمل اجرائی طرح			۱.۹۲۴	۷.۰۹	۱۰.۱۶	۰.۸۶	۳.۵۶	۳.۵۶	۱.۶۵	0.05
		میزان تجربه مورد نیاز پیمانکاران و کارگران			۰.۶۵۰	۲.۱۶	۳.۴۸	۰.۳۱	۱.۲۵	۱.۲۵	۰.۶۲	0.05
		امتیاز بخش (درصد)				۱۰.۴۵٪	۲۰.۳۱٪	۲۳.۶۱٪	۱۹.۹۴٪	۱۵.۷۹٪	۹.۹۰٪	
ضوابط اقتصادی	۲.۵۴	میزان تأثیر بهسازی در کاهش میزان خسارات احتمالی			۲.۰۳۶	۳.۵۸	۱۶.۲۳	۲.۳۸	۶.۶۵	۶.۶۵	۱۶.۲۳	0.04
		هزینه مصالح به منظور اجرای طرح	۳.۸۸	هزینه تخریب نقاط مورد نیاز	۲.۶۰۵	۶۵.۳۴	۳۴.۷۱	۱۱۶.۰۴	۱۶.۲۱	۱۶.۲۱	۸.۵۴	0.05
				هزینه تقویت ساختمان	۶.۳۳۳	۲۳۴.۶۶	۸۱.۶۹	۱۸.۸۹	۴۴.۶۰	۱۶۳.۴۳	۸۱.۶۹	0.07
				هزینه ترمیم نقاط تقویت شده	۱.۰۶۲	۲۲.۶۷	۱۲.۶۸	۴۵.۱۶	۸.۱۷	۱۲.۶۸	۳.۳۹	0.08
		هزینه تجهیزات و ماشین آلات مورد نیاز			۱.۰۴۴	۴.۰۷	۵.۸۱	۱۱.۵۳	۲.۰۷	۲.۰۷	۰.۹۷	0.06
		هزینه کارگر برای اجرای طرح			۰.۳۵۶	۳.۹۱	۰.۹۴	۲.۵۱	۰.۴۸	۰.۹۴	۰.۲۵	0.07
		میزان تأثیر بهسازی در ارزش اقتصادی بنا			۰.۳۳۷	۰.۳۶	۰.۳۶	۰.۳۶	۲.۴۹	۲.۴۹	۲.۴۹	0.00
		حفظ کاربری در حین اجرای طرح			۲.۳۴۳	۲.۰۵	۵.۸۶	۲.۰۵	۱۶.۵۲	۱۶.۵۲	۱۶.۵۲	0.05
		امتیاز بخش (درصد)				۲۹.۴۷٪	۱۳.۸۶٪	۱۷.۴۲٪	۸.۵۱٪	۱۹.۳۵٪	۱۱.۳۹٪	
ضوابط فنی	۴.۴۶	تأثیر طرح بر وزن ساختمان (وزن مصالح افزوده شده)			۰.۲۷۷	۳.۲۶	۰.۶۴	۴.۶۵	۱.۵۸	۱.۵۸	۰.۶۴	0.03
		استفاده از حداکثر ظرفیت سازه			۰.۴۵۶	۷.۹۱	۱.۱۳	۷.۹۱	۱.۱۳	۱.۱۳	۱.۱۳	0.00
		تطابق طرح پیشنهادی با میزان صلبیت سقف			۰.۶۴۱	۱۰.۳۵	۱.۱۹	۱۰.۳۵	۲.۷۶	۲.۷۶	۱.۱۹	0.02
		کامل نمودن مسیر بار			۰.۱۵۹	۰.۲۴	۱.۶۵	۰.۲۴	۱.۶۵	۱.۶۵	۱.۶۵	0.00
		تأثیر بر روی منظمی ساختمان			۰.۷۹۶	۲.۶۴	۱۱.۲۶	۱.۲۲	۴.۷۷	۴.۷۷	۱۰.۸۳	0.06
		تأثیر بر روی پیچش سازه (افزایش مقاومت پیچشی)			۰.۶۵۶	۲.۳۷	۳.۵۹	۱.۰۸	۵.۶۳	۵.۶۳	۱۰.۹۵	0.09
		میزان تقویت در پی سازه			۰.۳۸۶	۴.۹۳	۱.۸۴	۸.۱۹	۰.۸۹	۰.۸۹	۰.۴۷	0.06
		افزایش انسجام ساختمان			۱.۰۰۳	۲.۰۰	۶.۴۱	۱.۱۳	۱۴.۴۰	۱۴.۴۰	۶.۴۱	0.04
		افزایش سختی ساختمان			۰.۲۳۰	۰.۶۵	۳.۴۰	۰.۲۶	۱.۸۰	۱.۰۳	۳.۱۳	0.07
		افزایش شکل پذیری ساختمان			۰.۱۳۸	۰.۲۸	۱.۴۰	۰.۲۸	۱.۴۰	۱.۴۰	۱.۴۰	0.00
		نحوه اتصال به دیافراگم طبقه			۱.۲۷۶	۱۲.۸۹	۷.۴۳	۲۸.۷۴	۴.۱۰	۱.۹۰	۱.۹۰	0.07
		اصلاح نواقص موضعی دیوارها	۰.۴۷	اصلاح اجرای واحدهای بنایی	۰.۲۶۳	۰.۲۵	۱.۲۵	۰.۲۵	۱.۲۵	۱.۲۵	۱.۲۵	0.00
				اصلاح درزهای قائم واحدهای بنایی	۰.۹۰۲	۰.۸۶	۴.۲۸	۰.۸۶	۴.۲۸	۴.۲۸	۴.۲۸	0.00
				نسبت ارتفاع به ضخامت	۲.۳۳۳	۲۴.۴۳	۵.۵۴	۲.۱۶	۵.۵۴	۵.۵۴	۵.۵۴	0.01
				طول زیاد دیوار	۱.۲۰۰	۱۲.۵۷	۲.۸۵	۱.۱۱	۲.۸۵	۲.۸۵	۲.۸۵	0.01
				ارتفاع زیاد دیوار	۱.۵۸۰	۱۶.۵۴	۳.۷۵	۱.۴۶	۳.۷۵	۳.۷۵	۳.۷۵	0.01
				مقاومت خارج از صفحه دیوار	۳.۲۲۴	۳۳.۷۶	۷.۶۵	۲.۹۹	۷.۶۵	۷.۶۵	۷.۶۵	0.01
				برطرف نمودن ضعف تراکم دیوارها	۰.۴۹۷	۵.۲۱	۱.۱۸	۰.۴۶	۱.۱۸	۱.۱۸	۱.۱۸	0.01
		اصلاح نواقص اتصالات دیوارها	۰.۱۷	تقویت اتصال دیوارهای باربر متقاطع	۲.۸۲۸	۸.۱۲	۱.۱۶	۸.۱۲	۱.۱۶	۱.۱۶	۱.۱۶	0.00
				تقویت اتصال دیوارهای باربر و دال	۶.۴۳۴	۱۸.۴۶	۲.۶۴	۱۸.۴۶	۲.۶۴	۲.۶۴	۲.۶۴	0.00
				تقویت اتصال دیوارهای باربر و تیغه ها	۰.۷۳۸	۲.۱۲	۰.۳۰	۲.۱۲	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۳۰	0.00
		میزان تطابق دسترسی به وجوه مختلف ساختمان			۰.۱۳۲	۱.۷۲	۱.۷۲	۱.۷۲	۰.۲۵	۰.۲۵	۰.۲۵	0.00
		تأثیر طرح بر افزایش باربری ثقلی			۰.۰۸۸	۰.۲۰	۱.۹۹	۰.۲۰	۰.۵۱	۰.۵۱	۰.۵۱	0.02
		تأثیر طرح بر اجزای غیر سازه ای حساس به تغییرمکان			۰.۱۶۷	۰.۵۴	۲.۳۱	۰.۲۳	۱.۲۱	۰.۸۷	۲.۳۱	0.07
		تأثیر طرح بر اجزای غیر سازه ای حساس به شتاب			۰.۱۶۵	۱.۷۷	۰.۳۷	۳.۰۸	۰.۷۴	۱.۰۲	۰.۳۷	0.07
		میزان حساسیت عملکرد طرح به خطاهای محتمل	۱.۰۷	حساسیت به خطاهای طراحی	۱.۲۱۹	۲۰.۷۸	۴.۱۶	۲۰.۷۸	۴.۱۶	۴.۱۶	۴.۱۶	0.00
				حساسیت به خطاهای اجرائی	۲.۶۳۳	۳۷.۷۲	۱۲.۵۷	۳۷.۷۲	۱۲.۵۷	۱۲.۵۷	۱۲.۵۷	0.00
				حساسیت به خطاهای آزمایش	۵.۵۷۹	۱۲.۱۱	۶۰.۵۴	۱۲.۱۱	۶۰.۵۴	۶۰.۵۴	۶۰.۵۴	0.00
				حساسیت به خطاهای برداشت سونداژ	۰.۵۶۹	۲.۱۹	۱.۰۸	۹.۹۹	۴.۶۴	۴.۶۴	۴.۶۴	0.04
		وجود آیین نامه و ضوابط طراحی			۱.۳۴۴	۵.۴۸	۱۲.۶۹	۳.۷۳	۱۲.۶۹	۱۲.۶۹	۱۲.۶۹	0.02
		تجارب بدست آمده و عملکرد در زلزله های پیشین			۰.۱۴۹	۱.۳۲	۳.۱۹	۰.۲۹	۰.۶۳	۰.۶۳	۰.۶۳	0.04
		امکان سبک سازی ساختمان در حین اجرای طرح			۰.۲۳۵	۰.۷۵	۰.۷۵	۲.۲۴	۲.۲۴	۲.۲۴	۲.۲۴	0.00
		امتیاز بخش (درصد)				۲۲.۵۱٪	۱۵.۲۱٪	۱۷.۱۷٪	۱۵.۱۲٪	۱۴.۸۵٪	۱۵.۱۵٪	
تأثیر طرح بر معماری	۰.۴۸	میزان تأثیر در نمای ساختمان			۵.۵۷۹	۷.۶۲	۲.۶۸	۱۳.۰۳	۱.۱۲	۱.۱۲	۱.۱۲	0.03
		میزان تأثیر در فضا بندی ساختمان			۱.۲۱۹	۲.۱۷	۰.۶۷	۲.۱۷	۰.۲۸	۰.۲۸	۰.۲۸	0.02
		میزان تأثیر در نورگیری ساختمان			۲.۶۳۳	۳.۸۶	۱.۴۹	۵.۵۰	۰.۷۱	۰.۷۱	۰.۳۵	0.06
		تغییر کاربری فضاهای داخلی ساختمان			۰.۵۶۹	۰.۸۱	۰.۱۳	۰.۸۱	۰.۳۷	۰.۳۷	۰.۲۳	0.04
		امتیاز بخش (درصد)				۳۰.۲۰٪	۱۰.۳۷٪	۴۴.۹۳٪	۵.۱۸٪	۵.۱۸٪	۴.۱۴٪	
تأثیر طرح بر تأسیسات مکانیکی و برقی ساختمان (عدم نیاز به تغییر و جابجایی)					۰.۲۷۹	۰.۱۱	۰.۲۸	۰.۱۱	۰.۷۷	۰.۷۷	۰.۷۷	0.00
		امتیاز بخش (درصد)				۳.۷۸٪	۱۰.۰۱٪	۳.۷۸٪	۲۷.۴۸٪	۲۷.۴۸٪	۲۷.۴۸٪	
					مقدار امتیاز کسب شده	۲۲.۴۱٪	۱۳.۵۶٪	۱۶.۲۰٪	۱۱.۳۹٪	۱۵.۴۰٪	۱۱.۹۶٪	
					مقدار سابقه فعالیت مرتبط کارشناس		**ضریب سابقه فعالیت**	۱.۱				
					مقدار نهایی	۲۴.۶۵٪	۱۴.۹۲٪	۱۷.۸۲٪	۱۲.۵۳٪	۱۶.۹۴٪	۱۳.۱۶٪	

جدول ۵ محاسبه وزن نرمالیزه شده معیارهای اصلی مقایسه و انتخاب گزینه برتر

ارزیابی گزینه های بهسازی	مشخصات ساختمان	۸.۴۲٪
	ضوابط اجرائی	۱۳.۹۷٪
	ضوابط اقتصادی	۲۵.۴۰٪
	ضوابط فنی	۴۴.۶۳٪
	تأثیر طرح بر معماری	۴.۷۹٪
	تاثیر طرح بر تاسیسات	۲.۷۹٪

	پارامتر (۱) به (۲)	پارامتر (۲) به (۱)
مشخصات ساختمان- ضوابط اجرائی		اهمیت کم
مشخصات ساختمان- ضوابط اقتصادی		اهمیت متوسط
مشخصات ساختمان- ضوابط فنی		اهمیت زیاد
مشخصات ساختمان- تأثیر طرح بر معماری	اهمیت کم	
مشخصات ساختمان- تأثیر طرح بر تأسیسات	اهمیت متوسط	
ضوابط اجرائی- ضوابط اقتصادی		اهمیت کم
ضوابط اجرائی - ضوابط فنی		اهمیت متوسط
ضوابط اجرائی - تأثیر طرح بر معماری	اهمیت متوسط	
ضوابط اجرائی - تأثیر طرح بر تأسیسات	اهمیت متوسط	
ضوابط اقتصادی- ضوابط فنی		اهمیت کم
ضوابط اقتصادی- تأثیر طرح بر معماری	اهمیت زیاد	
ضوابط اقتصادی- تأثیر طرح بر تأسیسات	اهمیت زیاد	
ضوابط فنی - تأثیر طرح بر معماری	اهمیت زیاد	
ضوابط فنی - تأثیر طرح بر تأسیسات	اهمیت بسیار زیاد	
تأثیر طرح بر معماری - تأثیر طرح بر تأسیسات	اهمیت کم	

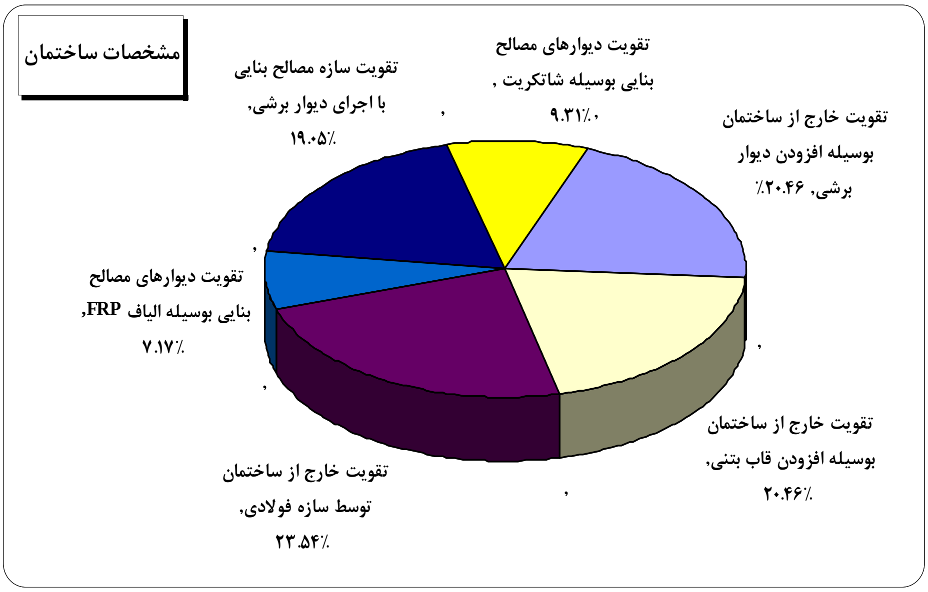
	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}	a_{i5}	a_{i6}
a_{1j}	۱	۰.۳۳	۰.۲۰	۰.۱۴	۳.۰۰	۵.۰۰
a_{2j}	۳.۰۰	۱	۰.۳۳	۰.۲۰	۵.۰۰	۵.۰۰
a_{3j}	۵.۰۰	۳.۰۰	۱	۰.۳۳	۷.۰۰	۷.۰۰
a_{4j}	۷.۰۰	۵.۰۰	۳.۰۰	۱	۷.۰۰	۹.۰۰
a_{5j}	۰.۳۳	۰.۲۰	۰.۱۴	۰.۱۴	۱	۳.۰۰
a_{6j}	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۱۴	۰.۱۱	۰.۳۳	۱
$\sum_{i,j=1}^{n} a_{ij} =$	۱۶.۵۳	۹.۷۳	۴.۸۲	۱.۹۳	۲۳.۳۳	۳۰.۰۰

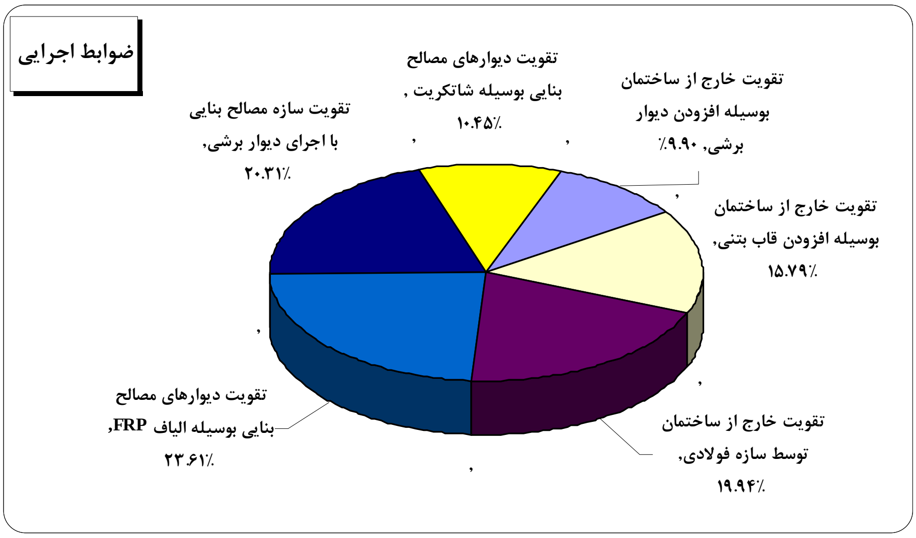
$a_{ij} \Big/ \sum_{i,j=1}^{n} a_{ij}$

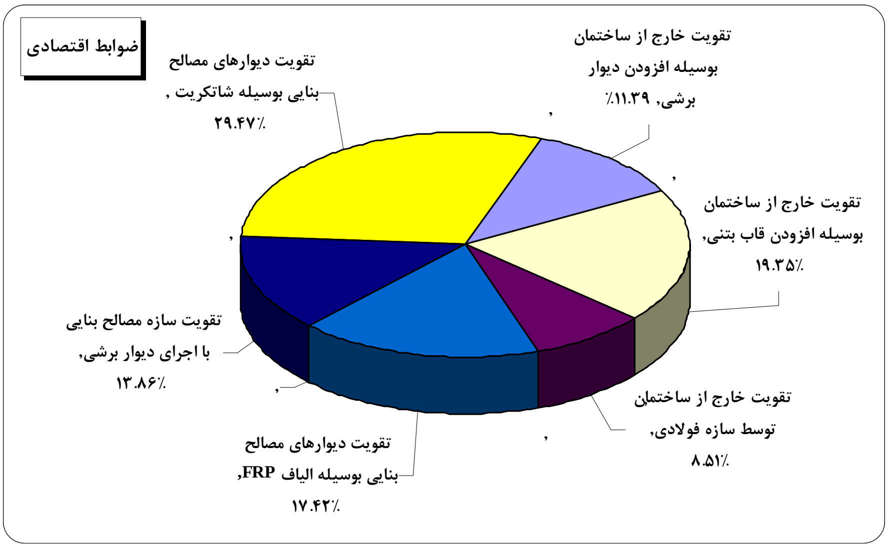
						W_i
۰.۰۶	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۷	۰.۱۳	۰.۱۷	W_1= **۰.۰۸٤۲**
۰.۱۸	۰.۱۰	۰.۰۷	۰.۱۰	۰.۲۱	۰.۱۷	W_2= **۰.۱۳۹۷**
۰.۳۰	۰.۳۱	۰.۲۱	۰.۱۷	۰.۳۰	۰.۲۳	W_3= **۰.۲۵٤۰**
۰.۴۲	۰.۵۱	۰.۶۲	۰.۵۲	۰.۳۰	۰.۳۰	W_4= **۰.٤٤٦۳**
۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۷	۰.۰۴	۰.۱۰	W_5= **۰.۰٤۷۹**
۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۶	۰.۰۱	۰.۰۳	W_6= **۰.۰۲۷۹**

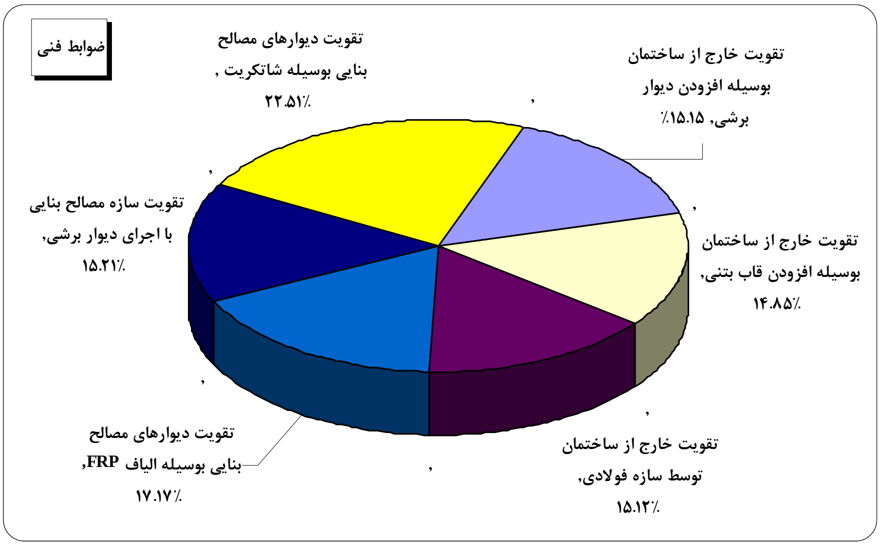
با ملاحظه نتایج به دست آمده مشخص گردید (نمودار ٤) در بخش مشخصات ساختمان، گزینه افزودن قاب فولادی از خارج ساختمان، در بخش ضوابط اجرایی و هم‌چنین تأثیر طرح بر معماری، گزینه تقویت دیوارها وسیله الیاف FRP، در بخش ضوابط اقتصادی و فنی، گزینه تقویت دیوارها به وسیله شاتکریت و در بخش تأثیر طرح بر تأسیسات گزینه‌های تقویت از خارج ساختمان دارای برتری می‌باشند.

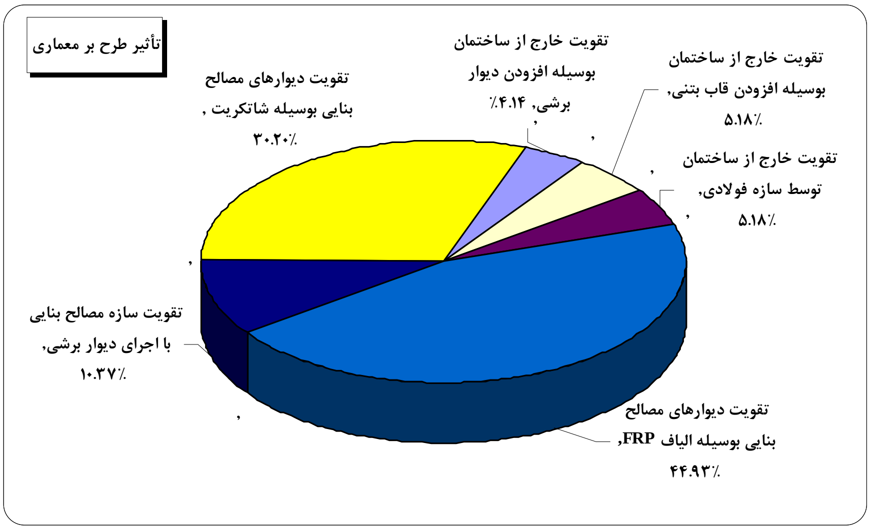
نمودار ٤ نتایج ارزیابی مقایسه‌ای گزینه‌های بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی در هر یک از معیارهای اصلی

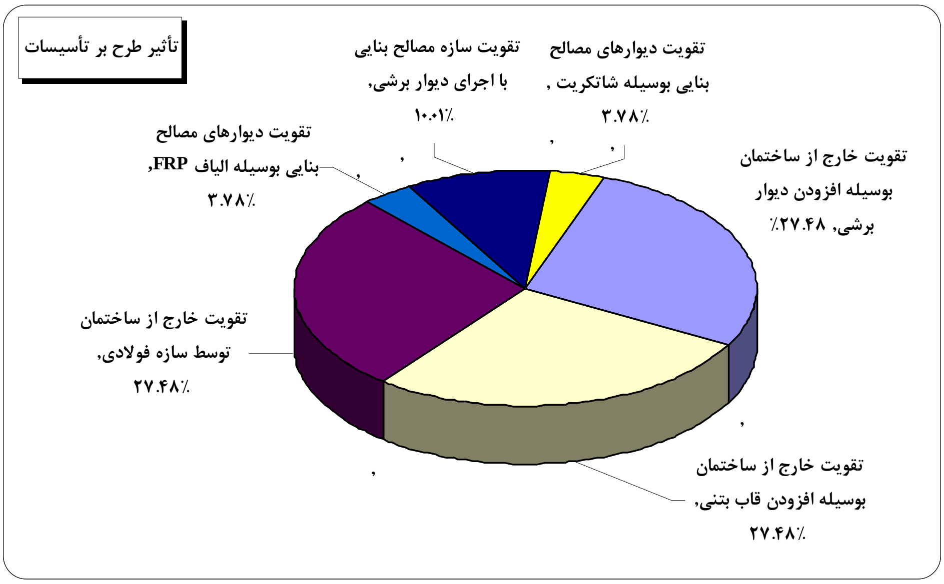




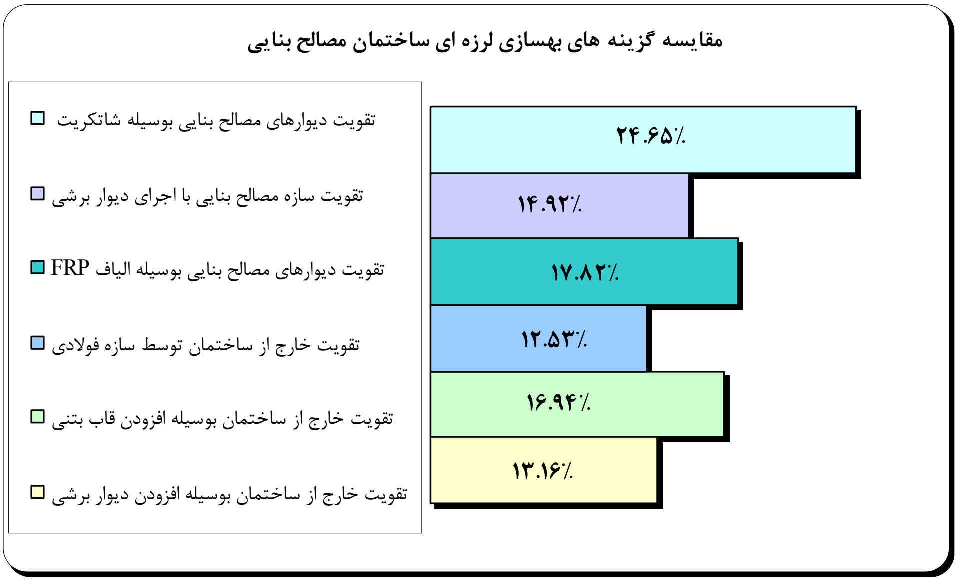

ضوابط اقتصادی
تقویت دیوارهای مصالح
بنایی بوسیله شاتکریت ,
۲۹.۴۷٪
تقویت خارج از ساختمان
بوسیله افزودن دیوار
برشی, ۱۱.۳۹٪
تقویت خارج از ساختمان
بوسیله افزودن قاب بتنی,
۱۹.۳۵٪
تقویت سازه مصالح بنایی
با اجرای دیوار برشی,
۱۳.۸۶٪
تقویت خارج از ساختمان
توسط سازه فولادی,
۸.۵۱٪
تقویت دیوارهای مصالح
بنایی بوسیله الیاف FRP,
۱۷.۴۲٪


ضوابط فنی
تقویت دیوارهای مصالح
بنایی بوسیله شاتکریت ,
۲۲.۵۱٪
تقویت خارج از ساختمان
بوسیله افزودن دیوار
برشی, ۱۵.۱۵٪
تقویت سازه مصالح بنایی
با اجرای دیوار برشی,
۱۵.۲۱٪
تقویت خارج از ساختمان
بوسیله افزودن قاب بتنی,
۱۴.۸۵٪
تقویت دیوارهای مصالح
بنایی بوسیله الیاف FRP,
۱۷.۱۷٪
تقویت خارج از ساختمان
توسط سازه فولادی,
۱۵.۱۲٪


تأثیر طرح بر معماری
تقویت دیوارهای مصالح
بنایی بوسیله شاتکریت ,
۳۰.۲۰٪
تقویت خارج از ساختمان
بوسیله افزودن دیوار
برشی, ۴.۱۴٪
تقویت خارج از ساختمان
بوسیله افزودن قاب بتنی,
۵.۱۸٪
تقویت خارج از ساختمان
توسط سازه فولادی,
۵.۱۸٪
تقویت سازه مصالح بنایی
با اجرای دیوار برشی,
۱۰.۳۷٪
تقویت دیوارهای مصالح
بنایی بوسیله الیاف FRP,
۴۴.۹۳٪



نمودار ۵ نتیجه نهایی بررسی گزینه‌های بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی



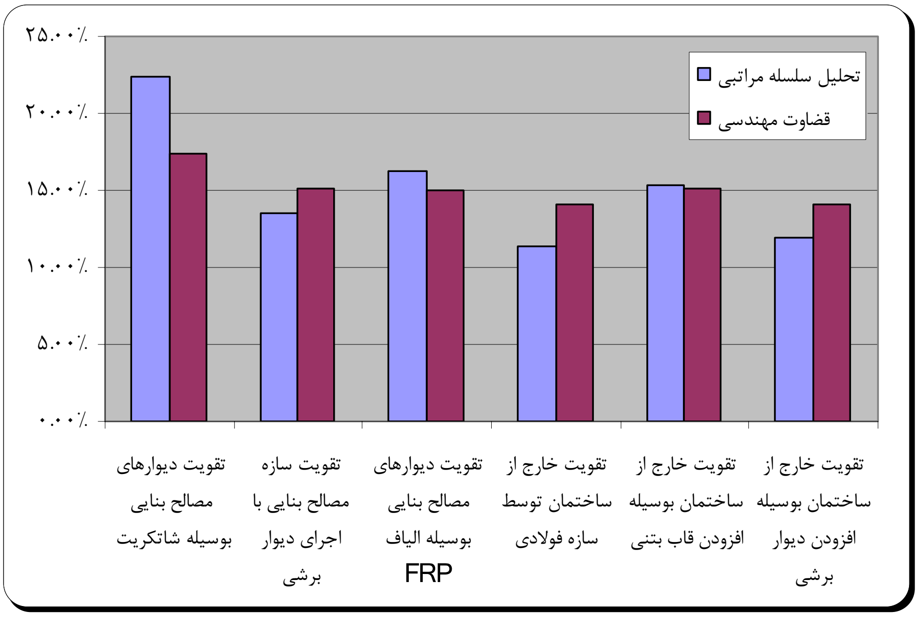
نتیجه نهایی ارزیابی، حاکی از اولویت انتخاب گزینه تقویت ساختمان با استفاده از شاتکریت دیوارهای مصالح بنایی می‌باشد (نمودار ۵).

از طرف دیگر نتایج حاصله به گونه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که مشخص گردید هر یک از گزینه‌ها در کدام از پارامترهای مؤثر دارای ارجحیت می‌باشد (جدول ٦). این جدول از آن حیث قابل ارزیابی می‌باشد که با توجه به ضعف‌های موجود سازه مورد بررسی، گزینه بهینه محتمل قابل انتخاب باشد.

جدول ۶ ارجحیت گزینه ها در معیارهای مختلف ارزیابی

تقویت بوسیله شاتکریت	افزودن دیوار برشی داخلی	تقویت بوسیله FRP	افزودن قاب فولادی از خارج	افزودن قاب بتنی از خارج	افزودن دیوار برشی خارجی
ابعاد پلان	کیفیت ساخت و اجرا	ابعاد پلان	افزایش سطح زیر بنا	افزایش سطح زیر بنا	افزایش سطح زیر بنا
در دسترس بودن مصالح مورد نیاز	وجود تکنولوژی ساخت و تولید	مدت اجرای طرح	درصد آسیب پذیری	درصد آسیب پذیری	درصد آسیب پذیری
هزینه تقویت ساختمان	در دسترس بودن مصالح مورد نیاز	مشکلات اجرای طرح	در دسترس بودن مصالح مورد نیاز	در دسترس بودن مصالح مورد نیاز	در دسترس بودن مصالح مورد نیاز
هزینه کارگر برای اجرای طرح	مکانیزه بودن اجرای طرح	هزینه تخریب نقاط مورد نیاز	میزان تأثیر بهسازی در ارزش اقتصادی بنا	میزان تأثیر بهسازی در ارزش اقتصادی بنا	میزان تأثیر بهسازی در کاهش میزان خسارات احتمالی
استفاده از حداکثر ظرفیت سازه	وجود دستور العمل اجرائی طرح	هزینه ترمیم نقاط تقویت شده	حفظ کاربری در حین اجرای طرح	حفظ کاربری در حین اجرای طرح	میزان تأثیر بهسازی در ارزش اقتصادی بنا
تطابق طرح پیشنهادی با میزان صلبیت سقف	میزان تجربه مورد نیاز پیمانکاران و کارگران	هزینه تجهیزات و ماشین آلات مورد نیاز	کامل نمودن مسیر بار	کامل نمودن مسیر بار	حفظ کاربری در حین اجرای طرح
نسبت ارتفاع به ضخامت	میزان تأثیر بهسازی در کاهش میزان خسارات احتمالی	تأثیر طرح بر وزن ساختمان	افزایش انسجام ساختمان	افزایش انسجام ساختمان	کامل نمودن مسیر بار
طول زیاد دیوار	کامل نمودن مسیر بار	استفاده از حداکثر ظرفیت سازه	افزایش شکل پذیری ساختمان	افزایش شکل پذیری ساختمان	تأثیر بر روی پیچش سازه
ارتفاع زیاد دیوار	تأثیر بر روی منظمی ساختمان	تطابق طرح پیشنهادی با میزان صلبیت سقف	اصلاح اجرای واحدهای بنایی	اصلاح اجرای واحدهای بنایی	افزایش شکل پذیری ساختمان
مقاومت خارج از صفحه دیوار	افزایش سختی ساختمان	میزان تقویت در پی سازه	اصلاح درزهای قائم واحدهای بنایی	اصلاح درزهای قائم واحدهای بنایی	اصلاح اجرای واحدهای بنایی
برطرف نمودن ضعف تراکم دیوارها	افزایش شکل پذیری ساختمان	نحوه اتصال به دیافراگم طبقه	میزان حساسیت به خطاهای آزمایش	میزان حساسیت به خطاهای آزمایش	اصلاح درزهای قائم واحدهای بنایی
تقویت اتصال دیوارهای باربر متقاطع	اصلاح اجرای واحدهای بنایی	تقویت اتصال دیوارهای باربر متقاطع	وجود آیین نامه و ضوابط طراحی	وجود آیین نامه و ضوابط طراحی	تأثیر طرح بر اجزای غیر سازه ای حساس به تغییرمکان
تقویت اتصال دیوارهای باربر و دال	اصلاح درزهای قائم واحدهای بنایی	تقویت اتصال دیوارهای باربر و دال	امکان سبک سازی ساختمان در حین اجرای طرح	امکان سبک سازی ساختمان در حین اجرای طرح	میزان حساسیت به خطاهای آزمایش
تقویت اتصال دیوارهای باربر و تیغه ها	میزان تطابق دسترسی به وجوه مختلف ساختمان	تقویت اتصال دیوارهای باربر و تیغه ها	تأثیر طرح بر تأسیسات مکانیکی و برقی ساختمان	تأثیر طرح بر تأسیسات مکانیکی و برقی ساختمان	وجود آیین نامه و ضوابط طراحی
میزان تطابق دسترسی به وجوه مختلف ساختمان	تأثیر طرح بر افزایش باربری ثقلی	میزان تطابق دسترسی به وجوه مختلف ساختمان			امکان سبک سازی ساختمان در حین اجرای طرح
میزان حساسیت به خطاهای طراحی	تأثیر طرح بر اجزای غیر سازه ای حساس به تغییرمکان	تأثیر طرح بر اجزای غیر سازه ای حساس به شتاب			تأثیر طرح بر تأسیسات مکانیکی و برقی ساختمان
میزان حساسیت به خطاهای اجرائی	میزان حساسیت به خطاهای آزمایش	میزان حساسیت به خطاهای طراحی			
میزان تأثیر در فضا بندی ساختمان	وجود آیین نامه و ضوابط طراحی	میزان حساسیت به خطاهای اجرائی			
تغییر کاربری فضاهای داخلی ساختمان	تجارب بدست آمده و عملکرد در زلزله های پیشین	میزان حساسیت به خطاهای برداشت سونداژ			
		امکان سبک سازی ساختمان در حین اجرای طرح			
		میزان تأثیر در نمای ساختمان			
		میزان تأثیر در فضا بندی ساختمان			
		میزان تأثیر در نورگیری ساختمان			
		تغییر کاربری فضاهای داخلی ساختمان			

نمودار ٦ مقایسه نتایج ارزیابی گزینه‌های بهسازی در دو روش مختلف



مقایسه روش تحلیل سلسله مراتبی و قضاوت مهندسی

جهت انجام تصمیم گیری‌ها روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. در سال‌های اخیر مطالعات گوناگونی، در زمینه‌های مختلف انجام پذیرفته است که نویسندگان مطالعه‌ای در رابطه با ارزشیابی گزینه‌های بهسازی با استفاده از روش قضاوت مهندسی مبتنی بر جمع آوری نظرات کارشناسان و امتیاز دهی بر اساس مقایسه گروهی معیارها انجام داده اند [٢٢] نتایج این مطالعه با استفاده از روش اشاره شده و مطالعه پیشین، در خصوص ارزیابی گزینه‌های بهسازی ساختمان‌های مصالح بنایی غیرمسلح مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این مقایسه نشانگر دقت نسبتاً قابل قبول روش قضاوت مهندسی کارشناسان در برآورد گزینه برتر می باشد. ذکر این نکته ضروری است که دقت نتایج، رابطه مستقیم با دقت گروه تصمیم گیرنده و نقش تعیین کننده در میزان پراکندگی نتیجه دارد. اما در روش تحلیل سلسله مراتبی به دلیل استفاده از مقایسه زوجی معیارها و گزینه‌ها، دقت در تصمیم گیری و هم‌چنین مشخص سازی طول اختلاف نسبی آن‌ها در شرایط بهتری می‌باشد (نمودار ٦).

نتیجه گیری

هدف این تحقیق، توسعه فرآیند کاربردی برای انتخاب گزینه برتر بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های مصالح بنایی غیر مسلح بوده است. به منظور مدل‌سازی فرآیند تصمیم، معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار در ارزیابی گزینه‌های بهسازی این ساختمان‌ها شناسایی شدند و گزینه‌های مرتبط بهسازی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه‌های زوجی اجزای تصمیم مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. در راستای ایجاد مدل فرآیند تصمیم گیری معیارها به شش گروه اصلی شامل: مشخصات ساختمان، ضوابط اجرایی، ضوابط اقتصادی، ضوابط فنی، تأثیر طرح بر معماری ساختمان و تأثیر طرح بر تأسیسات ساختمان تقسیم و زیرمعیارها مطابق با آنچه در متن بدان اشاره شد مورد مقایسه قرار گرفتند. در مقابل شش گزینه بهسازی متناسب با سازه های با مصالح بنایی شامل: تقویت

دیوارها توسط شاتکریت، افزودن دیوار برشی در داخل ساختمان، تقویت دیوارها توسط الیاف FRP، افزودن قاب فولادی و بتنی در خارج ساختمان و در نهایت افزودن دیوار برشی در خارج ساختمان ارایه گردید. به منظور ارزیابی روش ارایه شده نویسندگان با توجه به تجربیات حاصله در سال‌های اخیر، مطالعه‌ای در خصوص بررسی گزینه‌های پیشنهادی انجام داده است که این ارزیابی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام پذیرفته است. با استناد به ارزیابی انجام پذیرفته در بخش مشخصات ساختمان میزان آسیب پذیری وضع موجود ساختمان، در بخش ضوابط اجرایی مشکلات اجرایی طرح، در بخش ضوابط اقتصادی هزینه اجرای طرح، در بخش ضوابط فنی وجود آیین نامه و ضوابط طراحی و البته در بخش تأثیر طرح بر معماری ساختمان، میزان تأثیر در نمای ساختمان دارای اولویت در مقایسه با سایر پارامترهای مشخص شده در هر بخش می باشند. در پایان نتایج بررسی، بیانگر اهمیت ضوابط فنی طرح به عنوان معیار انتخاب و ارجحیت گزینه تقویت دیوارهای مصالح بنایی ساختمان با استفاده از شاتکریت است.

مراجع

1. Baker, D., Bridges, D., Hunter, R., Johnson, G., Krupa, J., Murphy, J., Sorenson, K., "Guide to decision-making methods", developed for the department of energy, WSRC-IM-2002-00002, (2002).

۲. قدسی پور، ح.، "مباحثی در تصمیم گیری چند معیاره- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۷۹).

3. Saaty, T.L.," The analytic hierarchy process", McGraw Hill, New York, (1980).
4. Saaty, T.L., "Relative measurement and its generalization in decision making why pair wise comparison are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process", RACSAM, statistics and operations research, vol 102 (2), pp 251-318, (2008).
5. Saaty, T. L., "Fundamental of the analytic network process-Multiple networks with benefits, costs, opportunities, risks", *journal of systems science and systems engineering,* vol. 13, no.3, pp 348-379, (2004).
6. Ahmed, A., Kusumo, R., Savci, S., Kayis, B., Zhou, M., Khoo, Y.B., "Application of analytical hierarchy process and Bayesian belief networks for risk analysis", complexity international, vol.12, (2005).
7. Majumdar, A., Sarkar, B., Majumdar, P.K., "Application of analytic hierarchy process for the selection of cotton fibers", fibers and polymers, vol.5, no.4, 297-302, (2004).
8. Armacost, R.L., Hosseini, J.C., Pet-Edward, J., "Using the analytic hierarchy process as a two-phase integrated decision approach for large nominal group", group decision and negotiation 8: pp. 535-555, (1999).
9. Coulter, E., D., Coakley, J., "The Analytic Hierarchy Process: A Tutorial for Use in Prioritizing Forest Road Investments to Minimize Environmental Effects", *International journal of forest engineering,* Volume 17 No. 2, July (2006).

10. Linkov, I., Varghese, A., Jamil, S., Seager, T.P., Kiker, G., Bridges, T., "Multi-criteria decision analysis: A framework for structuring remedial decisions at contaminated sites, comparative risk assessment and environmental decision making", kluwer, pp 15-54, (2004).
11. Khanmohammadi, S., Almeida Ribeiro, R., Jassbi, J., "Multi-criteria decision making using dynamics criteria", 03C-MED-T3-013.
12. Ishizaka, A., Labib, A., "Analytic hierarchy process and expert choice: Benefit and limitation", ORInsight, 22(4), pp.201-220, (2009).
13. Chen, H., "A research based on fuzzy AHP for multi-criteria supplier selection in supply chain", pc01.lib.ntust.edu.tw, (2005).
14. Mc Caffrey, J., "The Analytic Hierarchy Process, Test Run: The Analytic Hierarchy Process", MSDN Magazine, (2005).
15. Azmoodeh, B.M., Moghadam, A.S., "Optimum Seismic Retrofitting Technique for Buildings", civil engineering and environmental systems, Vol 28, Issue 1, pp. 61-74, (2011).
16. Grossi, P.A., "Assessing the Benefits and Costs of Earthquake Mitigation", Financial Institution Center, The Wharton school-University of Pennsylvania, (1998).
17. Balcomb, J.D., Curtner, A., "Multi-criteria decision-making process for buildings", NREL/CP-550-28533, (2000).
۱۸. محزون آزموده، ب.، سروقدمقدم، ع.، "پارامترهای مؤثر در ارزیابی گزینه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها"، همایش آشنایی با تکنولوژی‌های نوین بهسازی لرزه ای (نشریه شماره ۳۷۱)، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، (۱۳۸۵).
19. Seismic rehabilitation of existing buildings, American society of civil engineers (ASCE 41-06), (2007).
۲۰. مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های با مصالح بنایی (مبحث هشتم)، وزارت مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، (۱۳۸٤).
۲۱. آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۸٤–۲۸۰۰)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، کمیته دائمی بازنگری آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، (۱۳۸٤).
۲۲. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح موجود (نشریه ۳۷٦)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، (۱۳۸٦).
۲۳. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳٦۰)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، (۱۳۸۵).